

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
ФАКУЛЬТЕТ ЕЛЕКТРОЕНЕРГОТЕХНІКИ ТА АВТОМАТИКИ

ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЧНІ УСТАНОВКИ ТА СИСТЕМИ ПРАКТИКУМ

*Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для студентів,
які навчаються за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка»,
освітньою програмою «Електротехнічні пристрої та електротехнологічні
комплекси»*

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2020

Електротехнологічні установки та системи: Практикум [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», освітньої програми «Електротехнічні пристрої та електротехнологічні комплекси» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: В. О. Бржезицький, Я. О. Гаран, Є. О. Троценко. – Електронні текстові дані (1 файл: 0,8 МБайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 41 с.

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського (протокол № 3 від 05.11.2020 р.)
за поданням Вченої ради Факультету електроенергетехніки та автоматики (протокол № 2 від 28.09.2020 р.)*

Електронне мережне навчальне видання

ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЧНІ УСТАНОВКИ ТА СИСТЕМИ ПРАКТИКУМ

Укладачі:	<i>Бржезицький Володимир Олександрович</i> , д-р техн. наук, професор <i>Гаран Ярослав Олександрович</i> , канд. техн. наук, асистент <i>Троценко Євгеній Олександрович</i> , канд. техн. наук, доцент
Відповідальний редактор	<i>Проценко О. Р.</i> , кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри теоретичної електротехніки
Рецензент	<i>Кириленко В. М.</i> , кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри відновлюваних джерел енергії

Практикум з дисципліни «Електротехнологічні установки та системи» для студентів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» освітньо-професійної програми «Електротехнічні пристрої та електротехнологічні комплекси» призначений для поглибленого засвоєння студентами матеріалів курсу лекцій з даної дисципліни, одержання практичних навичок розрахунку параметрів вузлів електротехнологічних установок і комплексів, оптимальних режимів їх роботи. Практикум розрахований на виконання в аудиторіях кафедри теоретичної електротехніки КПІ ім. Ігоря Сікорського, а також може бути використаний для дистанційного навчання.

© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
Практичне заняття № 1	5
Тема: «Рухливість електронів в плазмі гелій-неонового лазера»	5
Практичне заняття № 2	9
Тема: «Характеристики коронного розряду»	9
Практичне заняття № 3	12
Тема: «Ступінь очищення газу в електрофільтрі».....	12
Практичне заняття № 4	15
Тема: «Розділення в електричному полі частинок малих розмірів (число Рейнольдса $< 0,5$) в коронному камерному сепараторі»	15
Практичне заняття № 5	19
Тема: «Розділення в електричному полі частинок середніх розмірів (число Рейнольдса $0,5 < Re < 1000$) в коронному камерному сепараторі».....	19
Практичне заняття № 6	23
Тема: «Розрахунок параметрів магнітної лінзи для фокусування електронного променя в електронно-променевої технологічній установці»	23
Практичне заняття № 7	26
Тема: «Густина потужності та діаметр пучка електронного променя електронно-променевої технологічної установки при відносних змінах його струму та напруги прискорення»	26
Практичне заняття № 8	30
Тема: «Розрахунок параметрів катоду електронно-променевої гармати»... ..	30
Практичне заняття № 9	37
Тема: «Реактивний опір магнітного розсіювання роздільного трансформатора системи електроживлення електронно-променевої технологічної установки»	37
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	41

ВСТУП

Практикум з дисципліни «Електротехнологічні установки та системи» орієнтований на детальний розгляд окремих теоретичних положень відповідної навчальної дисципліни, формування вмінь і навичок їхнього практичного застосування шляхом виконання студентами індивідуальних розрахункових завдань в аудиторіях кафедри теоретичної електротехніки КПІ ім. Ігоря Сікорського або у дистанційному навчанні.

Обсяг практикуму згідно програми навчальної дисципліни та робочої програми кредитного модуля «Електротехнологічні установки та системи» складає 18 годин, що відповідає дев'яти практичним заняттям.

На першому практичному занятті студенти опановують розрахунок рухливості електронів в плазмі гелій-неонового лазера, яка є визначальною характеристикою для розрахунку в подальшому її електропровідності.

На другому практичному занятті студенти розраховують характеристики коронного розряду (струм, втрати електроенергії), який є основою функціонування ряду електротехнологічних установок та систем.

Третє практичне заняття присвячене дослідженню ступеня очищення газу в горизонтальному електрофільтрі в залежності від міжелектродної відстані, робочої високої напруги, швидкості газу та довжини електродної системи електрофільтру.

На четвертому та п'ятому практичних заняттях студенти розраховують характеристики коронного камерного сепаратора для розділення частинок піску та золота без використання нині дефіцитної води.

На практичних заняттях №6 – №9 студенти шляхом розрахунків визначають головні параметри вузлів електронно-променевої технологічної установки, зокрема:

- магнітної фокусувальної лінзи;
- густини виділення енергії та діаметру пучка електронного променя електронної гармати;
- розмірів та характеристик її катодної групи;
- реактивного опору високовольтних роздільних трансформаторів системи електроживлення.

Матеріали, наведені у навчальному посібнику, сприяють закріпленню у студентів знань, умінь та навичок, набутих ними при вивченні лекційного матеріалу дисципліни «Електротехнологічні установки та системи».

Практичне заняття № 1

Тема: «Рухливість електронів в плазмі гелій-неонового лазера»

Завдання: Розрахувати рухливість електронів k_e в плазмі *He-Ne* лазера, якщо відомі концентрація атомів гелію n_{He} , концентрація атомів неону n_{Ne} та температура електронів нерівноважної плазми T_e . Транспортні перерізи Q_{He} , Q_{Ne} (в одиницях, $\times 10^{20} \text{ м}^2$) розсіювання електронів на відповідних атомах, в залежності від енергії електронів ε , вираженої в електрон-вольтах [eV], наведені у табл. 1. Розсіюванням електронів на іонах, в зв'язку з низьким ступенем іонізації плазми, можна нехтувати.

Таблиця 1.

$\varepsilon(\text{eV})$	0,01	0,02	0,04	0,06	0,08	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	1,0
Q_{He}	5,2	5,4	5,5	5,7	5,8	5,9	6,2	6,4	6,5	6,6	6,7	6,7	6,7	6,8
Q_{Ne}	0,5	0,5	0,5	0,57	0,64	0,70	0,93	1,09	1,22	1,32	1,40	1,47	1,53	1,62

$\varepsilon(\text{eV})$	2,0	2,5	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0
Q_{He}	7,0	7,0	6,9	6,6	6,3	6,0	6,0	6,0
Q_{Ne}	1,82	1,86	1,91	1,98	2,07	2,14	2,21	2,21

Рішення:

1) Знаходимо сумарний переріз розсіювання електронів на атомах гелію та неону:

$$\sum n_m \cdot Q_m = n_{He} \cdot Q_{He} + n_{Ne} \cdot Q_{Ne} \quad (1.1)$$

Для кожного значення енергії електрона за табл. 1 формуємо відповідну таблицю 2 з даними залежності $\varepsilon \rightarrow \sum n_m \cdot Q_m$.

2) Оскільки сумарний переріз розсіювання в залежності від енергії електрона змінюється «повільно», приймаємо, що на відповідних піддіапазонах енергії електрона ε : 0,01eV ... 0,02eV; 0,02eV ... 0,04eV; ... 7eV ... 8eV сумарний переріз є незмінним та дорівнює половині суми граничних

значень сумарного перерізу для кожного піддіапазону: $\overline{\sum n_m \cdot Q_m}$, а також формуємо відповідну таблицю 3, виду:

$\varepsilon(\text{eV})$	0,01	0,02	0,04	...	6,0	7,0	8,0
$\overline{\sum n_m \cdot Q_m}$

3) Шукане значення рухливості електронів можна визначити за формулою $k_e = \frac{e}{m_e} \left\langle \frac{1}{V_e} \right\rangle$, де e – заряд електрона ($e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл); m_e – маса електрона ($m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг); $\left\langle \frac{1}{V_e} \right\rangle$ розраховується за формулою (3.7) конспекту лекцій навчальної дисципліни:

$$\left\langle \frac{1}{V_e} \right\rangle = 1,393 \cdot 10^{-38} \cdot \frac{\sqrt{m_e}}{(k \cdot T_e)^{5/2}} \cdot \int_{\varepsilon_{\text{початкова}}}^{\varepsilon_{\text{кінцева}}} \frac{\varepsilon}{\sum n_m \cdot Q_m} \cdot \exp\left(-\frac{11600 \cdot \varepsilon}{T_e}\right) \cdot d\varepsilon, \quad (1.2)$$

де $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К (стала Больцмана).

Але, оскільки функція $\sum n_m \cdot Q_m$ є змінною, відповідний інтеграл (1.2) розраховується в границях кожного піддіапазону ε зі своїм середнім значенням $\overline{\sum n_m \cdot Q_m}$ для кожного піддіапазону за таблицею 3.

4) Кінцевий результат для $\left\langle \frac{1}{V_e} \right\rangle$ дорівнює сумі інтегралів (1.2) для всіх піддіапазонів енергії електронів ε за таблицею 3 і далі, відповідно, розраховується k_e .

5) Розрахунки виконувати до 6 значущих цифр результатів.
Варіанти для розрахунків наведено в таблиці 4:

Таблиця 4.

Варіант	$n_{He} \times 10^{-22}, \text{ м}^{-3}$	$n_{Ne} \times 10^{-21}, \text{ м}^{-3}$	$T_e, \text{ К}$
1	1,205	3,00	9750
2	1,210	2,95	9770
3	1,215	2,90	9790
4	1,220	2,85	9810
5	1,225	2,80	9830
6	1,230	2,75	9850
7	1,235	2,70	9870
8	1,240	2,65	9890
9	1,245	2,60	9910
10	1,250	2,55	9930
11	1,255	2,50	9950
12	1,260	2,45	9970
13	1,265	2,40	9990
14	1,270	2,35	10010
15	1,275	2,30	10030
16	1,280	2,25	10050
17	1,285	2,20	10070
18	1,290	2,15	10090
19	1,295	2,10	10110
20	1,300	2,00	10130
21	1,305	1,95	10150
22	1,310	1,90	10170
23	1,315	1,85	10190
24	1,320	1,80	10210
25	1,325	1,75	10230

Практичне заняття № 2

Тема: «Характеристики коронного розряду»

Завдання: Розрахувати вольт-амперну характеристику коронного розряду та витрати електроенергії, якщо відомі діаметри внутрішнього d та зовнішнього D циліндричних електродів, а також їх довжина $h = 1$ м для середовища повітря з тиском p та температурою $t^{\circ}\text{C}$. Впливом вологості повітря та крайовими ефектами електродів можна нехтувати. Полярність внутрішнього електроду – від’ємна.

Рішення:

- 1) Знаходимо відносну густину повітря за формулою:

$$\delta = \frac{p}{p_0} \cdot \frac{T_0}{T} = \frac{p \text{ (мм. рт. ст.)}}{760 \text{ (мм. рт. ст.)}} \cdot \frac{273 + 20}{273 + t(^{\circ}\text{C})}. \quad (2.1)$$

- 2) Розраховуємо початкову напруженість електричного поля за формулою Піка:

$$E_0 = 30,3 \cdot \delta \cdot \left(1 + \frac{0,298}{\sqrt{r_0 \cdot \delta}} \right) \text{ кВ/см}, \quad (2.2)$$

де $r_0 = d/2$ – радіус внутрішнього електроду, см.

- 3) Початкова напруга для заданих умов визначається за формулою:

$$U_0 = E_0 \cdot r_0 \cdot \ln \frac{D}{d}, \text{ кВ}. \quad (2.3)$$

- 4) Струм коронного розряду для довжини електродів $h = 1$ м = 100 см розраховується за виразом:

$$I = k \cdot G \cdot U \cdot (U - U_0) \cdot h, \quad (2.4)$$

де U – напруга на електродах ($U > U_0$), виражена у В; k – рухливість іонів, яка дорівнює $2,24 \frac{\text{см}^2}{\text{В} \cdot \text{с}}$; G – геометричний фактор:

$$G = \frac{8 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0}{\left(\frac{D}{2}\right)^2 \cdot \ln\left(\frac{D}{d}\right)} \cdot \left(1 + 2,75 \cdot 10^{-2} \cdot \sqrt{\frac{D}{d}}\right). \quad (2.5)$$

Якщо у (2.4), (2.5) використовувати розміри в см, то $\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-14}$ Ф/см.

Формула (2.4) придатна для умов завдання, якщо U менше пробивної напруги проміжку U_{np} , тобто, $U_0 < U < 150$ кВ.

- 5) Побудувати графік залежності потужності втрат на корону $P = U \cdot I$ від напруги U для умов завдання.

Варіанти вхідних даних для виконання розрахунків

Варіант	d, см	D, см	h, см	р, мм. рт. ст.	t, °C
1	0,10	200	100	756	17
2	0,11	200	100	757	16
3	0,12	200	100	758	15
4	0,13	200	100	759	25
5	0,14	200	100	760	24
6	0,15	200	100	759	23
7	0,16	200	100	758	22
8	0,17	200	100	757	21
9	0,18	200	100	756	20
10	0,19	200	100	755	19
11	0,20	200	100	754	18
12	0,19	200	100	753	17
13	0,18	200	100	752	16
14	0,17	200	100	751	15
15	0,16	200	100	750	25
16	0,15	200	100	749	24
17	0,14	200	100	748	23

18	0,13	200	100	747	22
19	0,12	200	100	746	21
20	0,11	200	100	745	20
21	0,10	200	100	744	19
22	0,11	200	100	743	18
23	0,12	200	100	742	17
24	0,13	200	100	741	16
25	0,14	200	100	740	15

Практичне заняття № 3

Тема: «Ступінь очищення газу в електрофільтрі»

Завдання: Визначити ступінь очищення газу (причому, частка першої фракції за концентрацією частинок складає α) в горизонтальному електрофільтрі, якщо задані довжина електрофільтру l , H – відстань між коронуючими та осаджувальними електродами, швидкість газу в електрофільтрі V , напруга електрофільтру U_{BH} , сфероподібні частинки золи мають два значення діаметрів d_3 : d_1 та d_2 , відносна діелектрична проникність частинок золи $\epsilon_3 = 1,4$, густина газового середовища в електрофільтрі $\gamma_c = 1,3 \text{ кг/м}^3$, кінематична в'язкість середовища $\nu_c = 1,3 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$.

Рішення:

1) Знаходимо напруженість електричного поля за формулою:

$$E = \eta \cdot \frac{U_{BH}}{H}, \quad (3.1)$$

де η – коефіцієнт ослаблення поля в основній частині міжелектродного проміжку (приймаємо $\eta = 0,95$).

2) Визначаємо силу дії електричного поля на частинку золи для кожного діаметру d_1 та d_2 за формулою:

$$F_3 = q_3 \cdot E, \quad (3.2)$$

$$q_3 = \pi \cdot \epsilon_0 \cdot d_3^2 \cdot \left(1 + 2 \cdot \frac{\epsilon_3 - 1}{\epsilon_3 + 2} \right) \cdot E,$$

де $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$.

3) Визначаємо швидкість руху частинок під дією електричного поля для кожного діаметру d_1 та d_2 з рівняння:

$$F_3 = 3 \cdot \pi \cdot \nu_c \cdot \gamma_c \cdot d_3 \cdot V_3, \quad (3.3)$$

звідки:

$$V_3 = \frac{F_3}{3 \cdot \pi \cdot \nu_c \cdot \gamma_c \cdot d_3}. \quad (3.4)$$

4) Ступінь очищення газу в електрофільтрі для частинок з діаметром d_1 розраховуємо за формулою:

$$\eta_1 = \left[1 - \exp \left(\chi \cdot \frac{V_{31} \cdot l}{V \cdot H} \right) \right] \cdot 100\%, \quad (3.5)$$

де коефіцієнт $\chi = 1,1$.

5) Ступінь очищення газу в електрофільтрі для частинок з діаметром d_2 розраховуємо за формулою:

$$\eta_2 = \left[1 - \exp \left(\chi \cdot \frac{V_{32} \cdot l}{V \cdot H} \right) \right] \cdot 100\%. \quad (3.6)$$

6) Ступінь очищення газу в електрофільтрі, в цілому, визначається за формулою:

$$\eta = \alpha \cdot \eta_1 + (1 - \alpha) \cdot \eta_2. \quad (3.7)$$

Варіанти вхідних даних для виконання розрахунків

Варіант	V, м/с	U _{ВН} , кВ	d ₁ , мкм	d ₂ , мкм	α	l, м	H, м
1	1,04	60	8,0	12,6	0,30	3,16	0,2
2	1,03	60	8,1	12,7	0,31	3,17	0,2
3	1,02	60	8,2	12,8	0,32	3,18	0,2
4	1,01	60	8,3	12,9	0,33	3,19	0,2
5	1,00	60	8,4	13,0	0,34	3,20	0,2
6	1,01	60	8,5	12,9	0,35	3,19	0,2
7	1,02	60	8,6	12,8	0,36	3,18	0,2
8	1,03	60	8,7	12,7	0,37	3,17	0,2
9	1,04	60	8,8	12,6	0,38	3,16	0,2
10	1,05	60	8,9	12,5	0,39	3,15	0,2
11	1,06	60	9,0	12,4	0,40	3,14	0,2
12	1,07	60	9,1	12,3	0,39	3,13	0,2
13	1,08	60	9,2	12,2	0,38	3,12	0,2

14	1,09	60	9,3	12,1	0,37	3,11	0,2
15	1,10	60	9,4	12,0	0,36	3,10	0,2
16	1,09	60	9,5	11,9	0,35	3,09	0,2
17	1,08	60	9,6	11,8	0,34	3,08	0,2
18	1,07	60	9,7	11,7	0,33	3,07	0,2
19	1,06	60	9,8	11,6	0,32	3,06	0,2
20	1,05	60	9,9	11,5	0,31	3,05	0,2
21	1,04	60	10,0	11,4	0,30	3,04	0,2
22	1,03	60	9,9	11,3	0,31	3,03	0,2
23	1,02	60	9,8	11,2	0,32	3,02	0,2
24	1,01	60	9,7	11,1	0,33	3,01	0,2
25	1,00	60	9,6	11,0	0,34	3,00	0,2

Практичне заняття № 4

Тема: «Розділення в електричному полі частинок малих розмірів (число Рейнольдса $< 0,5$) в коронному камерному сепараторі»

Завдання: знайти глибину (h_n та h_z) осадження (на осаджувальному електроді ОЕ) сфероподібних частинок піску (радіусом a_n) та золота (радіусом a_z) та час їхнього руху в електричному полі в коронному камерному сепараторі, якщо задана напруга на коронуючому електроді U_{BH} та міжелектродна відстань S . Частинки подаються у сепаратор через живильник Б на відстані b від коронуючого електроду КЕ.

Рішення:

1) Знаходимо напруженість електричного поля за формулою:

$$E = \eta \cdot \frac{U_{BH}}{S}, \quad (4.1)$$

де η – коефіцієнт ослаблення поля в основній частині міжелектродного проміжку (приймаємо рівним 0,95).

2) Сила дії електричного поля на частинку піску визначається за формулою:

$$F_n = q_n \cdot E, \quad (4.2)$$

де $q_n = -4 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0 \cdot a_n^2 \cdot \left(1 + 2 \cdot \frac{\varepsilon_n - 1}{\varepsilon_n + 2}\right) \cdot E$, ε_n – відносна діелектрична проникність

матеріалу піску; $\varepsilon_0 \approx 8,854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м. Сила, що діє на частинку золота, визначається за формулою:

$$F_z = q_z \cdot E = -12 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0 \cdot a_z^2 \cdot E^2. \quad (4.3)$$

3) Сила тяжіння, що діє на частинку піску визначається за формулою:

$$P_n = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot a_n^3 \cdot \gamma_n \cdot g, \quad (4.4)$$

де γ_n – густина матеріалу піску; $g \approx 9,81$ м/с² (прискорення вільного падіння).

Сила тяжіння, що діє на частинку золота визначається за формулою:

$$P_3 = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot a_3^3 \cdot \gamma_3 \cdot g, \quad (4.5)$$

де $\gamma_3 = 19350 \text{ кг/м}^3$ – густина матеріалу золота.

4) Глибина осадження частинок піску визначається за формулою:

$$h_n = (S - b) \cdot \frac{P_n}{|F_n|}, \quad (4.6)$$

глибина осадження частинок золота визначається за формулою:

$$h_3 = (S - b) \cdot \frac{P_3}{|F_3|}. \quad (4.7)$$

5) Швидкість руху частинки піску V_n знаходимо з рівняння:

$$\sqrt{F_n^2 + P_n^2} = 6 \cdot \pi \cdot \nu_c \cdot \gamma_c \cdot a_n \cdot V_n, \quad (4.8)$$

де ν_c та γ_c – відповідно, кінематична в'язкість та густина середовища повітря:

$\nu_c = 1,3 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$; $\gamma_c = 1,3 \text{ кг/м}^3$. Швидкість руху частинки золота V_3 знаходимо з рівняння:

$$\sqrt{F_3^2 + P_3^2} = 6 \cdot \pi \cdot \nu_c \cdot \gamma_c \cdot a_3 \cdot V_3. \quad (4.9)$$

6) Час руху частинки піску визначаємо за формулою:

$$t_n = \frac{\sqrt{(S - b)^2 + h_n^2}}{V_n}; \quad (4.10)$$

Час руху частинки золота визначаємо за формулою:

$$t_3 = \frac{\sqrt{(S - b)^2 + h_3^2}}{V_3}. \quad (4.11)$$

Вхідні дані: ($1 \text{ мкм} < a_3 < 10 \text{ мкм}$); a_n ; γ_n ; ε_n ; S , b , U_{BH} .

Перевірка результатів: $\text{Re}_n = \frac{2 \cdot a_n \cdot V_n}{\nu_c} < 0,5$; $\text{Re}_3 = \frac{2 \cdot a_3 \cdot V_3}{\nu_c} < 0,5$.

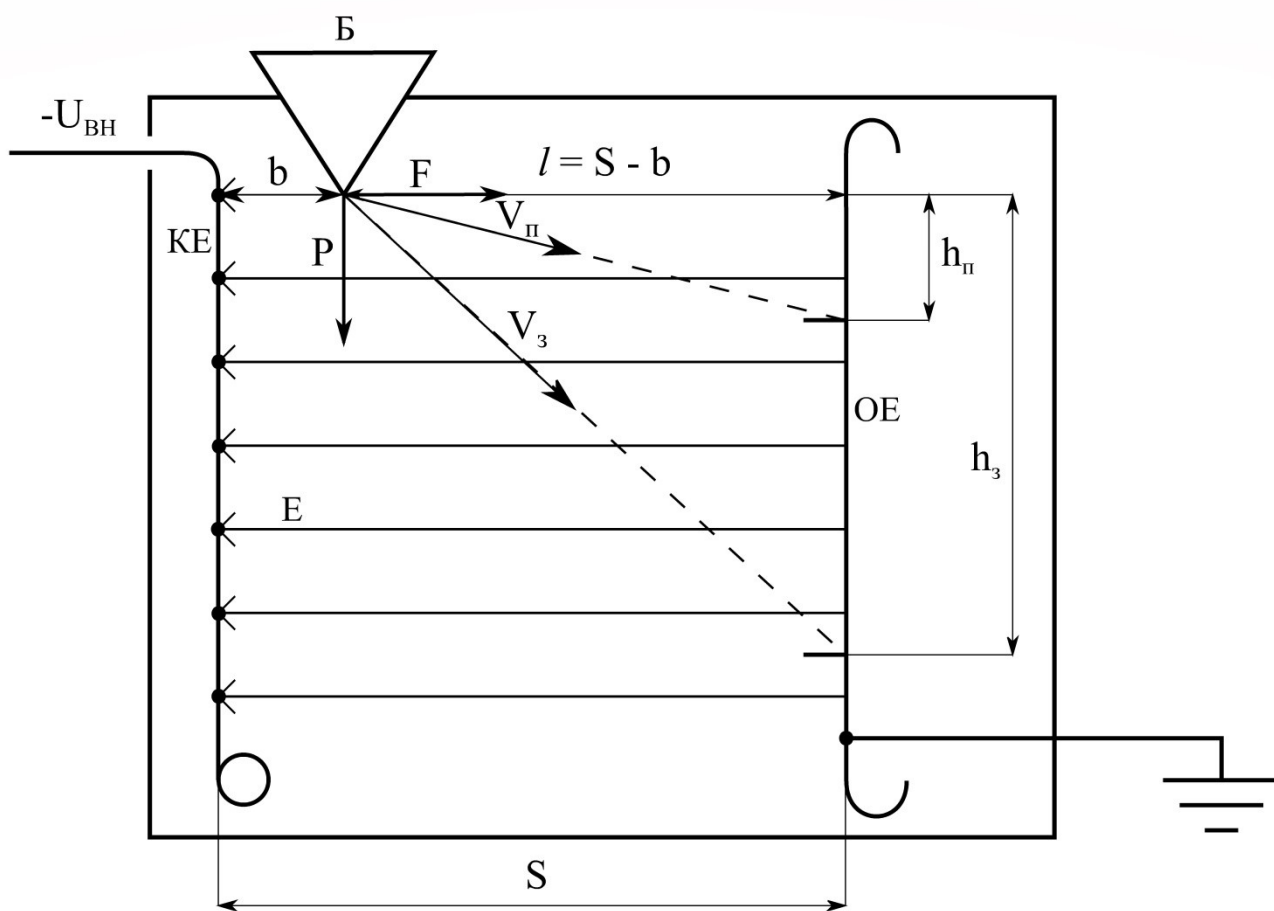


Рисунок 4.1 – Схема электродів коронного камерного сепаратора

Варіанти вхідних даних для виконання розрахунків

	Вхідні величини для розрахунків						
Варіант	U_{BH} , кВ	S, см	a_n , мкм	a_z , мкм	$\gamma_{ш}$ кг/м ³	ϵ_n	b, см
1	50	35	8	1	2301	4,301	4
2	51	36	8,5	1,45	2302	4,302	4,1
3	52	37	9	1,9	2303	4,303	4,2
4	53	38	9,5	2,35	2304	4,304	4,3
5	54	39	10	2,8	2305	4,305	4,4
6	55	40	10,5	3,25	2306	4,306	4,5
7	56	41	11	3,7	2307	4,307	4,6
8	57	42	11,5	4,15	2308	4,308	4,7
9	58	43	12	4,6	2309	4,309	4,8
10	59	44	12,5	5,05	2310	4,310	4,9
11	60	45	13	5,5	2311	4,311	5
12	61	46	13,5	5,95	2312	4,312	5,1
13	62	47	14	6,4	2313	4,313	5,2
14	63	48	14,5	6,85	2314	4,314	5,3
15	64	49	15	7,3	2315	4,315	5,4
16	65	50	15,5	7,75	2316	4,316	5,5
17	66	51	16	8,2	2317	4,317	5,6
18	67	52	16,5	8,65	2318	4,318	5,7
19	68	53	17	9,1	2319	4,319	5,8
20	69	54	17,5	9,55	2320	4,32	5,9

Практичне заняття № 5

Тема: «Розділення в електричному полі частинок середніх розмірів (число Рейнольдса $0,5 < Re < 1000$) в коронному камерному сепараторі»

Завдання: знайти глибину (h_n та h_z) осадження (на осаджувальному електроді ОЕ) сфероподібних частинок піску (радіусом a_n) та золота (радіусом a_z) та час їхнього руху в електричному полі в коронному камерному сепараторі, якщо задана напруга на коронуючому електроді U_{BH} та міжелектродна відстань S . Частинки подаються у сепаратор через живильник Б на відстані b від коронуючого електроду КЕ.

Рішення:

1) Знаходимо напруженість електричного поля за формулою:

$$E = \eta \cdot \frac{U_{BH}}{S}, \quad (5.1)$$

де η – коефіцієнт ослаблення поля в основній частині міжелектродного проміжку (приймаємо рівним 0,95).

2) Сила дії електричного поля на частинку піску визначається за формулою:

$$F_n = q_n \cdot E, \quad (5.2)$$

де $q_n = -4 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0 \cdot a_n^2 \cdot \left(1 + 2 \cdot \frac{\varepsilon_n - 1}{\varepsilon_n + 2}\right) \cdot E$, ε_n – відносна діелектрична проникність

матеріалу піску; $\varepsilon_0 \approx 8,854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м. Сила, що діє на частинку золота, визначається за формулою:

$$F_z = q_z \cdot E = -12 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0 \cdot a_z^2 \cdot E^2. \quad (5.3)$$

3) Сила тяжіння, що діє на частинку піску визначається за формулою:

$$P_n = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot a_n^3 \cdot \gamma_n \cdot g, \quad (5.4)$$

де γ_n – густина матеріалу піску; $g \approx 9,81$ м/с².

Сила тяжіння, що діє на частинку золота визначається за формулою:

$$P_3 = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot a_3^3 \cdot \gamma_3 \cdot g, \quad (5.5)$$

де $\gamma_3 = 19350 \text{ кг/м}^3$ – густина матеріалу золота.

4) Число Рейнольдса для піску визначається за формулою:

$$\text{Re}_n = \frac{2 \cdot a_n \cdot V_n}{\nu_c}, \quad (5.6)$$

число Рейнольдса для золота визначається за формулою:

$$\text{Re}_3 = \frac{2 \cdot a_3 \cdot V_3}{\nu_c}, \quad (5.7)$$

де ν_c – кінематична в'язкість середовища повітря: $\nu_c = 1,3 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$.

5) Швидкість руху частинки піску V_n знаходимо з рівняння:

$$\sqrt{F_n^2 + P_n^2} = 24 \cdot \pi \cdot \gamma_c \cdot a_n^2 \cdot \frac{V_n^2}{2 \cdot \text{Re}_n} \cdot \left(1 + \frac{\text{Re}_n^{\frac{2}{3}}}{6} \right), \quad (5.8)$$

де γ_c – густина середовища повітря: $\gamma_c = 1,3 \text{ кг/м}^3$. Швидкість руху частинки золота V_3 знаходимо з рівняння:

$$\sqrt{F_3^2 + P_3^2} = 24 \cdot \pi \cdot \gamma_c \cdot a_3^2 \cdot \frac{V_3^2}{2 \cdot \text{Re}_3} \cdot \left(1 + \frac{\text{Re}_3^{\frac{2}{3}}}{6} \right). \quad (5.9)$$

6) Глибина осадження частинок піску визначається за формулою:

$$h_n = (S - b) \cdot \frac{P_n}{|F_n|}, \quad (5.10)$$

глибина осадження частинок золота визначається за формулою:

$$h_3 = (S - b) \cdot \frac{P_3}{|F_3|}. \quad (5.11)$$

7) Час руху частинки піску визначаємо за формулою:

$$t_n = \frac{\sqrt{(S - b)^2 + h_n^2}}{V_n}; \quad (5.12)$$

час руху частинки золота визначаємо за формулою:

$$t_3 = \frac{\sqrt{(S-b)^2 + h_3^2}}{V_3}. \quad (5.13)$$

Вхідні дані: ($a_n \sim 100$ мкм); a_3 ; γ_n ; ε_n ; S , b , U_{BH} .

Перевірка результатів: $0,5 < Re_n < 1000$; $0,5 < Re_3 < 1000$.

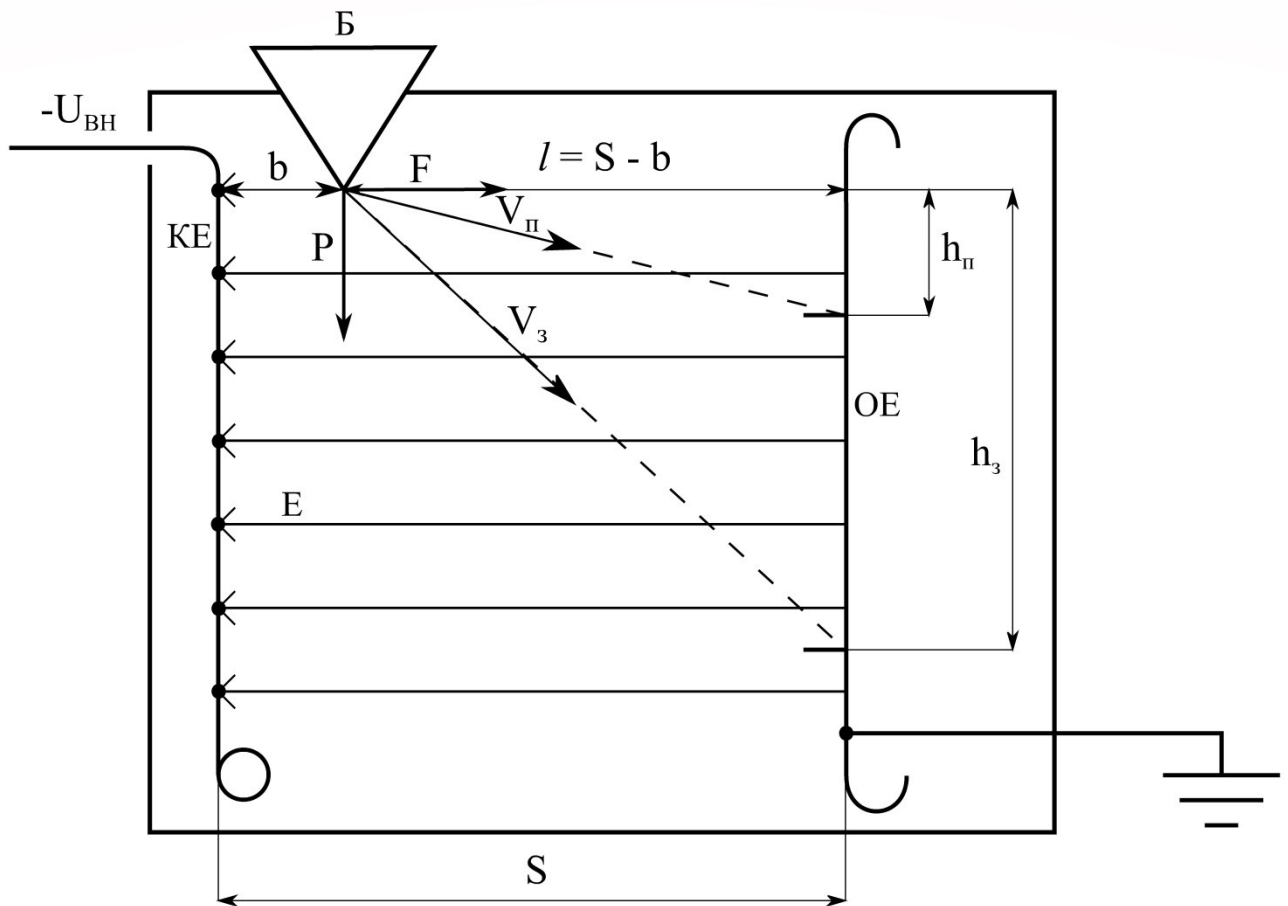


Рисунок 5.1 – Схема електродів коронного камерного сепаратора

Варіанти вхідних даних для виконання розрахунків

	Вхідні величини для розрахунків						
Варіант	U_{BH} , кВ	S , см	a_n , мкм	a_z , мкм	$\gamma_{ш}$ кг/м ³	ϵ_n	b , см
1	50	35	80	50	2301	4,301	4
2	51	36	82	52	2302	4,302	4,1
3	52	37	84	54	2303	4,303	4,2
4	53	38	86	56	2304	4,304	4,3
5	54	39	88	58	2305	4,305	4,4
6	55	40	90	60	2306	4,306	4,5
7	56	41	92	62	2307	4,307	4,6
8	57	42	94	64	2308	4,308	4,7
9	58	43	96	66	2309	4,309	4,8
10	59	44	98	68	2310	4,310	4,9
11	60	45	100	70	2311	4,311	5
12	61	46	102	72	2312	4,312	5,1
13	62	47	104	74	2313	4,313	5,2
14	63	48	106	76	2314	4,314	5,3
15	64	49	108	78	2315	4,315	5,4
16	65	50	110	80	2316	4,316	5,5
17	66	51	112	82	2317	4,317	5,6
18	67	52	114	84	2318	4,318	5,7
19	68	53	116	86	2319	4,319	5,8
20	69	54	118	88	2320	4,32	5,9

Практичне заняття № 6

Тема: «Розрахунок параметрів магнітної лінзи для фокусування електронного променя в електронно-променевої технологічній установці»

Завдання: побудувати графічну залежність індукції магнітного поля B_z на вісі Z котушки магнітної лінзи (від її середини до половини висоти), якщо задана прискорювальна напруга електронно-променевої установки $U_{np.}$, внутрішній радіус котушки $R_{вн.}$, зовнішній радіус котушки $R_{зовн.}$, висота котушки H , фокусна відстань магнітної лінзи f , постійний струм живлення котушки магнітної лінзи I та коефіцієнт η , що враховує наявність магнітного осердя котушки та його параметри. Визначити максимальне та мінімальне значення індукції магнітного поля на вісі магнітної лінзи по її висоті. Магнітна лінза призначена для використання в електронній гарматі для фокусування потоку електронів на оброблювану поверхню.

Рішення:

- 1) Вважаючи, що витки котушки розташовуються в перерізі рівномірно, визначаємо середній радіус витків:

$$R_{сер.} = \frac{R_{вн.} + R_{зовн.}}{2}. \quad (6.1)$$

- 2) Визначаємо кількість витків у котушці з формули, яка визначає залежність кількості апертур-витків котушки від величини прискорювальної напруги, що створює потік електронів $U_{np.}$, середнього радіусу витків котушки $R_{сер.}$, фокусувальної відстані магнітної лінзи f , та коефіцієнту η , що враховує наявність та параметри магнітного осердя (за відсутності осердя цей коефіцієнт дорівнює 1):

$$N \cdot I = \eta \cdot 10 \cdot \sqrt{\frac{U_{np.} \cdot R_{сер.}}{f}}, \quad (6.2)$$

де N – кількість витків котушки, I – струм живлення котушки.

3) Індукція магнітного поля на вісі котушки зі струмом визначається за формулою:

$$B_z = \frac{\mu_0 \cdot N \cdot I \cdot R_{\text{сер.}}^2}{2 \cdot (R_{\text{сер.}}^2 + z^2)^{3/2}}, \quad (6.3)$$

де μ_0 – магнітна стала, що дорівнює $4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м, z – координата по вісі котушки від її центру, м.

4) Максимальні значення індукції магнітного поля котушки магнітної лінзи та одиничного кругового витка зі струмом одержуються з формули (6.3) при нульовому значенні координати z . Мінімальне значення індукції магнітного поля котушки магнітної лінзи визначити з формули (6.3) при $z = 0,5 \cdot H$.

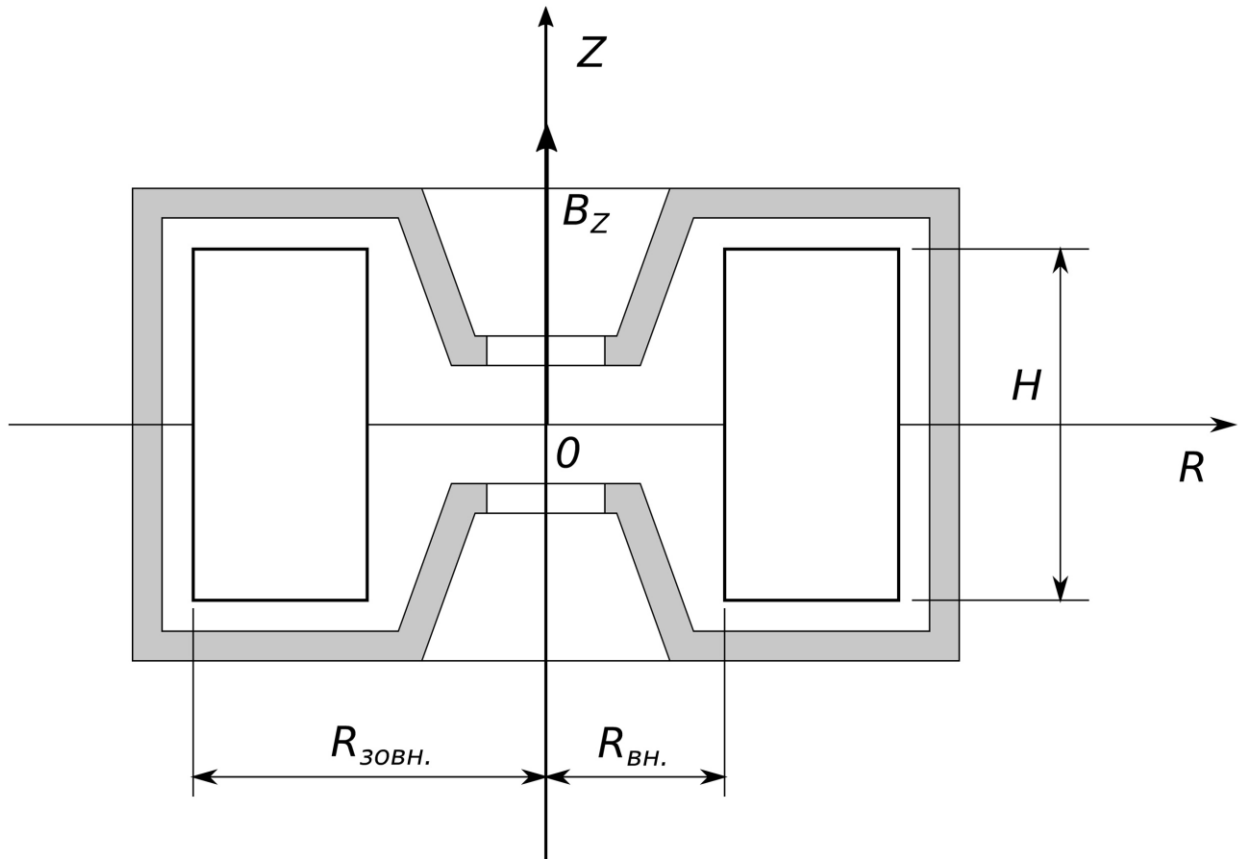


Рисунок 6.1 – Схематичний переріз котушки магнітної лінзи.

Варіанти вхідних даних для виконання розрахунків

	<i>Вхідні величини для розрахунків</i>						
Варіант	$U_{\text{пр.}}, \text{кВ}$	$R_{\text{вн.}}, \text{см}$	$R_{\text{зовн.}}, \text{см}$	$f, \text{см}$	$H, \text{см}$	η	$I, \text{А}$
1	50	6,0	14,0	20	2,0	0,75	0,50
2	52	6,2	13,9	22	2,1	0,74	0,52
3	54	6,4	13,8	24	2,2	0,73	0,54
4	56	6,6	13,7	26	2,3	0,72	0,56
5	58	6,8	13,6	28	2,4	0,71	0,58
6	60	7,0	13,5	30	2,5	0,70	0,60
7	62	7,2	13,4	32	2,6	0,69	0,62
8	64	7,4	13,3	34	2,7	0,68	0,64
9	66	7,6	13,2	36	2,8	0,67	0,66
10	68	7,8	13,1	38	2,9	0,66	0,68
11	70	8,0	13,0	40	3,0	0,65	0,70
12	72	8,2	12,9	42	3,1	0,64	0,72
13	74	8,4	12,8	44	3,2	0,63	0,74
14	76	8,6	12,7	46	3,3	0,62	0,76
15	78	8,8	12,6	48	3,4	0,61	0,78
16	80	9,0	12,5	50	3,5	0,60	0,80
17	82	9,2	12,4	52	3,6	0,59	0,82
18	84	9,4	12,3	54	3,7	0,58	0,84
19	86	9,6	12,2	56	3,8	0,57	0,86
20	88	9,8	12,1	58	3,9	0,56	0,88

Практичне заняття № 7

Тема: «Густина потужності та діаметр пучка електронного променя електронно-променевої технологічної установки при відносних змінах його струму та напруги прискорення»

Завдання: за наведеними графічними зображеннями знайти нелінійні апроксимуючі функції (наприклад, вигляду $a \cdot x^2 + b \cdot x + c$, або $a \cdot \ln(x) + b$, або $a \cdot x^b$) для визначення:

- 1) залежності зміни густини потужності пучка електронного променя від зміни прискорювальної напруги;
- 2) залежності зміни діаметру пучка електронного променя від зміни прискорювальної напруги;
- 3) залежності зміни густини потужності пучка електронного променя від зміни струму пучка;
- 4) залежності зміни діаметру пучка електронного променя від зміни струму пучка.

У відповідності до варіантів завдання розрахувати, наскільки зміняться густина потужності p_x / p_0 пучка електронного променя та його діаметр d_x / d_0 при зміні прискорювальної напруги по відношенню до опорної напруги (U_x / U_0) в KU разів та при зміні струму пучка (i_x / i_0) в KI разів.

Рішення:

б) Для визначення функцій, що апроксимують дані графіків рис. 7.1, необхідно визначити пари числових значень по відповідних осях для кожного з графіків наведених на рис. 7.1 функцій. Для кожного з графіків треба знайти щонайменше 6 точок та записати відповідні числа по осях абсцис та ординат у відповідні комірки табличного процесору типу Microsoft Excell, або Libre Office, або WPS Office, або аналогічні, вбудовані засоби яких дозволяють будувати апроксимуючі криві різних видів для рядів чисел та визначати числові коефіцієнти таких кривих. Слід зауважити, що графік

рис. 7.1 побудований в логарифмічному масштабі вісі ординат, тому треба уважно визначати числові значення по вісі ординат.

7) За допомогою обраного табличного процесора побудувати точкові діаграми для кожного ряду пар чисел, що відповідають графікам рис. 7.1. Для кожної з точкових діаграм за допомогою інструменту «Лінія тренду» побудувати апроксимуючу криву, для якої похибка середньоквадратичного відхилення значень апроксимуючої функції від точкових значень буде найменшою. Відобразити на створених графіках апроксимуючих функцій їх відповідні рівняння та значення коефіцієнту достовірності апроксимації (якщо цей коефіцієнт R^2 є меншим, ніж 0,85, вважати обрану апроксимуючу функцію недостовірною).

8) Визначити за допомогою одержаних апроксимуючих функцій, як зміняться співвідношення p_x / p_0 та d_x / d_0 при зміні співвідношень KU та KI у $KU, (KU)^2, (KU)^3; KI, (KI)^2, (KI)^3$ разів, відповідно.

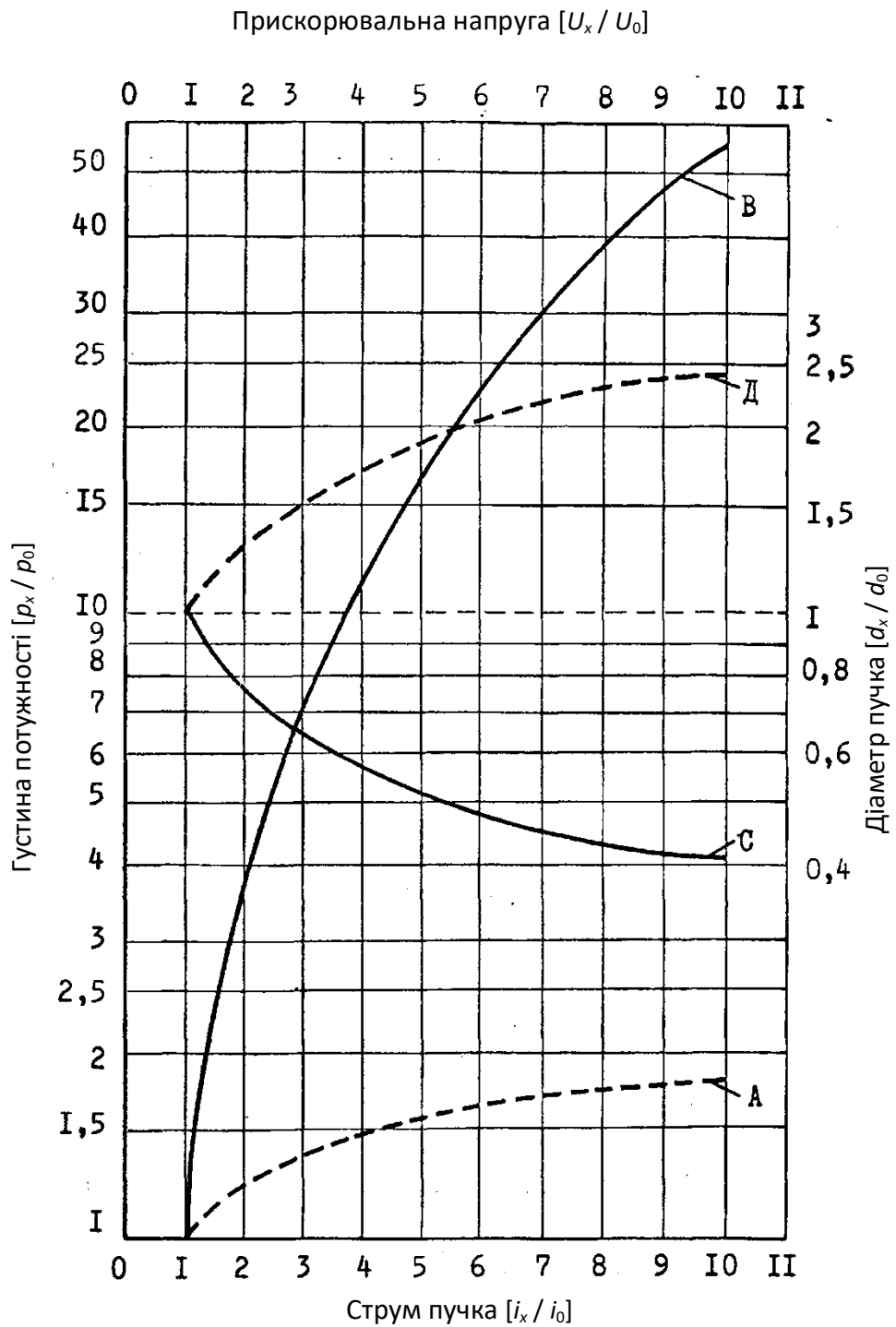


Рисунок 7.1 – Густина потужності p та діаметр пучка d при відносних змінах струму та напруги: А - $p = f(i)$ при $U = \text{const}$; В - $p = f(U)$ при $i = \text{const}$; С - $d = f(U)$ при $i = \text{const}$; Д - $d = f(i)$ при $U = \text{const}$.

Варіанти вхідних даних для виконання розрахунків

	<i>Співвідношення</i>	
Варіант	<i>KU</i>	<i>KI</i>
1	1,1	2,05
2	1,15	2,0
3	1,2	1,95
4	1,25	1,9
5	1,3	1,85
6	1,35	1,8
7	1,4	1,75
8	1,45	1,7
9	1,5	1,65
10	1,55	1,6
11	1,6	1,5
12	1,65	1,5
13	1,7	1,45
14	1,75	1,4
15	1,8	1,35
16	1,85	1,3
17	1,9	1,25
18	1,95	1,2
19	2,0	1,15
20	2,05	1,1

Практичне заняття № 8

Тема: «Розрахунок параметрів катоду електронно-променевої гармати»

Завдання: для V -подібного катоду довжиною L_k , виготовленого з вольфрамового проводу – дроту круглого перерізу, для заданого режиму роботи катоду Mod , його температури T та струму емісії I_s визначити діаметр D проводу, струм розжарення катоду I_p , напругу розжарення катоду U_p , опір катоду R , ефективність катоду H та довговічність катоду t .

Рішення:

1) У відповідності до експериментальних значень параметрів катоду, наведених в табл. 8.1 для одиничного катоду (діаметр D' та довжина L' якого дорівнюють 1 см), методом інтерполяції або апроксимації, визначити значення R' (опір одиничного катоду, Ом), P' (потужність одиничного катоду, Вт), I' (струм розжарення одиничного катоду, А), U' (напруга розжарення одиничного катоду, В), I'_s (струм емісії одиничного катоду, А) та M' (швидкість випаровування матеріалу з поверхні катоду, г/с), що відповідають варіанту вхідних даних до завдання.

2) Для визначення густини струму термоемісії з поверхні катоду використовують формулу Річардсона-Дешмана:

$$j_{so} = A \cdot T^2 \cdot e^{\frac{-b}{T}}, \quad (8.1)$$

де j_{so} – густина струму, А/см²; $A = 120,4$ А/(см²·К²); T – температура, К; $b = 11600 \cdot \phi$, К; ϕ – різниця потенціалів (потенціальний бар'єр) на границі метал – вакуум (для вольфраму $\phi = 4,58$ В).

Параметри ідеалізованого катоду довжиною L , площею перерізу S_k та периметром цього перерізу l_n , розраховують за формулами:
площа поверхні емісії:

$$S_e = l_n \cdot L; \quad (8.2)$$

опір катоду:

$$R = \rho \cdot \frac{L}{S_{\kappa}}, \quad (8.3)$$

де ρ – питомий опір матеріалу, Ом·см.

При підключенні до катоду напруги розжарювання U_p , по катоду протікає струм розжарювання I_p , при цьому майже вся потужність P_p випромінюється в навколишнє середовище у вигляді теплового випромінювання, та розраховується за формулою:

$$P_p = \sigma \cdot l_n \cdot L, \quad (8.4)$$

де σ – питома випромінювання тепла з поверхні (Вт/см²). Оскільки потужність, яка витрачається на емісію електронів $P_e = \varphi \cdot I_s \ll P_p$, можна записати для потужності розжарювання $P_p = U_p \cdot I_p$. Тоді для усталеної температури розжарювання катоду можна записати:

$$P_p = \sigma \cdot l_n \cdot L = I_p^2 \cdot R = I_p^2 \cdot \frac{\rho \cdot L}{S_{\kappa}} = \frac{U_p^2}{R} = \frac{U_p^2 \cdot S_{\kappa}}{\rho \cdot L}. \quad (8.5)$$

З рівняння (8.5) одержуємо вирази для напруги та струму розжарювання:

$$I_p = \sqrt{\frac{\sigma}{\rho}} \cdot \sqrt{S_{\kappa} \cdot l_n}; \quad (8.6)$$

$$U_p = \sqrt{\sigma \cdot \rho} \cdot \sqrt{\frac{l_n}{S_{\kappa}}} \cdot L. \quad (8.7)$$

При цьому, струм емісії з поверхні ідеального катоду можна розрахувати за формулою:

$$I_s = j_{so} \cdot l_n \cdot L. \quad (8.8)$$

3) Якщо катод має круглий переріз, то можна використовувати поняття «одиничний катод», тобто катод, діаметр D' та довжина L' якого однакові, та дорівнюють 1 см. Для такого катоду вирази (8.2 – 8.8) та вирази для периметру та площі перерізу катоду спростяться до наступних:

$$l_n' = \pi \cdot D' = \pi; \quad (8.9)$$

$$S_{\kappa}' = \frac{\pi \cdot D'^2}{4} = \frac{\pi}{4}; \quad (8.10)$$

$$R' = \frac{4 \cdot \rho}{\pi}; \quad (8.11)$$

$$P' = \pi \cdot \sigma; \quad (8.12)$$

$$I' = \frac{\pi}{2} \cdot \sqrt{\frac{\sigma}{\rho}}; \quad (8.13)$$

$$U' = 2 \cdot \sqrt{\rho \cdot \sigma}; \quad (8.14)$$

$$I'_s = \pi \cdot j_{so}. \quad (8.15)$$

Значення R' , P' , I' , U' та I'_s , одержані за формулами (8.11 – 8.15), містяться в табл. 8.1, тому, якщо використати ці значення з таблиці у формули (8.11 – 8.15) та використати одержані результати в формулах (8.2 – 8.8), можна одержати шукані значення параметрів катоду за формулами:

$$R = R' \cdot \frac{L_k}{D^2} \text{ (Ом)}; \quad (8.16)$$

$$P_p = P' \cdot D \cdot L_k \text{ (Вт)}; \quad (8.17)$$

$$I_p = I' \cdot D^{3/2} \text{ (А)}; \quad (8.18)$$

$$U_p = U' \cdot \frac{L_k}{D^{1/2}} \text{ (В)}; \quad (8.19)$$

$$I_s = I'_s \cdot D \cdot L_k \text{ (А)}. \quad (8.20)$$

Оскільки при використанні в електронній гарматі V -подібного катоду, фактично, емісія електронів відбувається з торця електроду (див. рис. 8.1 б, в), з достатньою точністю можна прийняти площу цієї поверхні рівною площі еліпсоїда, мала вісь якого дорівнює D , а велика – $2 \cdot D$. Також, з достатньою точністю можна вважати цю площу рівною половині площі бічної поверхні циліндра з діаметром кругової основи D та висотою $2 \cdot D$. Таким чином, формула (8.20) перетворюється до наступного вигляду:

$$I_s = I'_s \cdot \frac{1}{2} \cdot D \cdot 2 \cdot D = I'_s \cdot D^2 \text{ (А)}, \quad (8.21)$$

звідки знаходимо $D = \sqrt{\frac{I_s}{I'_s}}$.

4) Ефективність катоду H визначається як відношення струму емісії до потужності розжарення:

$$H = \frac{I_s}{P_p}. \quad (8.22)$$

5) Довговічність катоду визначають за допомогою табличного (з табл. 8.1) значення швидкості випаровування металу M' з поверхні електроду для відповідного значення температури. При цьому, оскільки при випаровуванні металу зменшується його переріз і, відповідно, збільшується опір, необхідно стабілізувати струм емісії одним з трьох способів: або стабілізацією температури розжарення, або стабілізацією струму розжарення, або стабілізацією напруги розжарення катоду. Для кожного з цих способів стабілізації струму емісії використовують наступні формули:

для $T = \text{const}$:

$$t = 8.5 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{D}{M'} \text{ (годин)}; \quad (8.23)$$

для $I_p = \text{const}$:

$$t = 2.4 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{D}{M'} \text{ (годин)}; \quad (8.24)$$

для $U_p = \text{const}$:

$$t = 1.2 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{D}{M'} \text{ (годин)}. \quad (8.25)$$

Таблиця 8.1

Характеристики вольфрамового катоду, в залежності від його температури

$T, \text{ K}$	$P', \text{ Вт}$	$R' \times 10^6, \text{ Ом}$	$I', \text{ А}$	$U' \times 10^3, \text{ В}$	$I'_s, \text{ А}$	$M', \text{ г/с}$
2300	148,2	85,22	1319	112,4	0,128	$2,45 \cdot 10^{-10}$
2400	181,2	89,65	1422	127,5	0,364	$1,37 \cdot 10^{-9}$
2500	219,3	94,13	1526	143,6	0,935	$6,36 \cdot 10^{-9}$
2600	263,0	98,66	1632	161,1	2,25	$2,76 \cdot 10^{-8}$
2700	312,7	103,22	1741	179,7	5,12	$9,95 \cdot 10^{-8}$
2800	368,9	107,85	1849	199,5	11,11	$3,51 \cdot 10^{-7}$
2900	432,4	112,51	1961	220,6	22,95	$1,08 \cdot 10^{-6}$
3000	503,5	117,21	2072	243,0	44,40	$3,04 \cdot 10^{-6}$

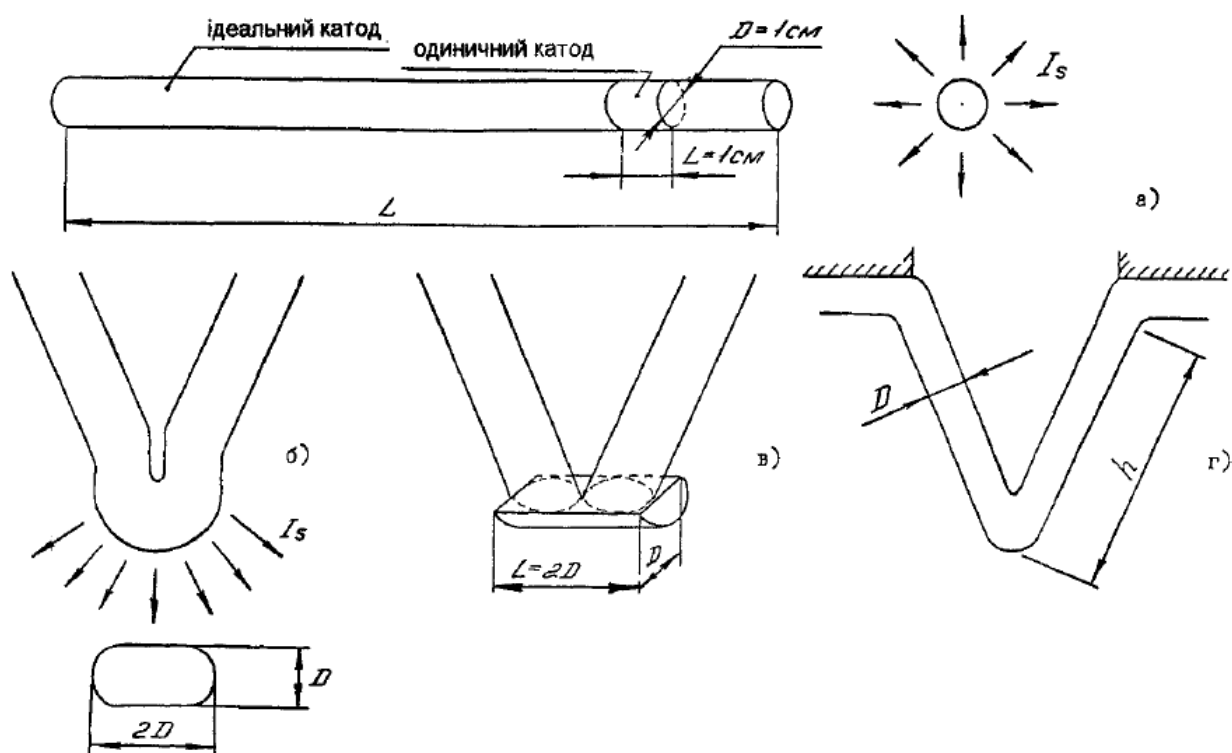


Рисунок 8.1 – До розрахунку струму емісії катоду.

Варіанти вхідних даних для виконання розрахунків

Варіант	Струм електронного пучка I_s , мА	Температура катоду T , К	Довжина катоду L_k , см	Режим роботи катоду
1	7	2300	0,8	$T = \text{const}$
2	8	2400	0,81	$I_p = \text{const}$
3	9	2500	0,82	$U_p = \text{const}$
4	10	2600	0,83	$T = \text{const}$
5	11	2700	0,85	$I_p = \text{const}$
6	12	2800	0,87	$U_p = \text{const}$
7	13	2900	0,88	$T = \text{const}$
8	7	3000	1,0	$I_p = \text{const}$
9	8	2300	1,05	$U_p = \text{const}$
10	9	2400	1,07	$T = \text{const}$
11	10	2500	1,09	$I_p = \text{const}$
12	11	2600	1,1	$U_p = \text{const}$
13	12	2700	1,15	$T = \text{const}$
14	13	2800	1,18	$I_p = \text{const}$
15	7	2900	1,2	$U_p = \text{const}$
16	6	3000	1,22	$T = \text{const}$
17	8	2300	1,24	$I_p = \text{const}$
18	9	2400	1,26	$U_p = \text{const}$
19	10	2500	1,27	$T = \text{const}$
20	11	2600	1,28	$I_p = \text{const}$
21	6	2700	1,3	$U_p = \text{const}$
22	8	2800	1,32	$T = \text{const}$
23	9	2900	1,35	$I_p = \text{const}$
24	10	3000	1,38	$U_p = \text{const}$

25	11	2300	1,4	$T = \text{const}$
26	6	2400	1,12	$I_p = \text{const}$
27	8	2500	1,14	$U_p = \text{const}$
28	11	2600	1,16	$T = \text{const}$
29	13	2700	0,7	$I_p = \text{const}$
30	15	2800	0,75	$U_p = \text{const}$

Практичне заняття № 9

Тема: «Реактивний опір магнітного розсіяння роздільного трансформатора системи електроживлення електронно-променевої технологічної установки»

Роздільний трансформатор (рис. 9.1) має 2 суцільні модулі (Модуль 1 та Модуль2), що містять первинну та вторинну обмотки, залиті епоксидним компаундом та запресовані на центральний стрижень броньового магнітопроводу таким чином, щоб відводи обмоток знаходились з протилежних боків стрижня магнітної системи.

Завдання: Розрахувати значення реактивного опору розсіяння роздільного трансформатора X_s , приведене до кількості витків його вторинної обмотки, якщо задана робоча частота f , товщина внутрішньої ізоляції (на одну сторону) модуля Δ_{iz} , мм; більша сторона перерізу обмотки складає $b_{обм}$, мм; менша сторона перерізу обмотки складає $h_{обм}$, мм; більша сторона перерізу стрижня магнітопроводу складає $h_{ст}$, мм; менша сторона перерізу стрижня магнітопроводу складає $b_{ст}$, мм; кількість витків у первинній та вторинній обмотках складає по W витків.

Рішення:

- 1) Знаходимо величину приведенного каналу розсіяння за формулою:

$$d = 2 \cdot \Delta_{iz} + b. \quad (9.1)$$

- 2) Розраховуємо середню довжину витка обмоток:

$$l_{сер} = 2 \cdot (b_{ст} + 2 \cdot \Delta_{iz} + h_{обм}) + 2 \cdot (h_{ст} + 2 \cdot \Delta_{iz} + h_{обм}). \quad (9.2)$$

- 3) Знаходимо коефіцієнт β відношення ширини обмотки b до величини приведенного каналу розсіяння d :

$$\beta = \frac{b}{d}. \quad (9.3)$$

4) Розраховуємо реактивний опір розсіяння роздільного трансформатора, приведений до кількості витків його вторинної обмотки W (Ом):

$$X_s = 8 \cdot \pi \cdot f \cdot l_{сер} \cdot W^2 \cdot \left[\ln \left(\frac{d}{b + h_{обм}} \right) + \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{1}{\beta} + 1 \right)^2 \cdot \ln(1 + \beta) + \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{1}{\beta} - 1 \right)^2 \cdot \ln(1 - \beta) \right] \cdot 10^{-10}. (9.4)$$

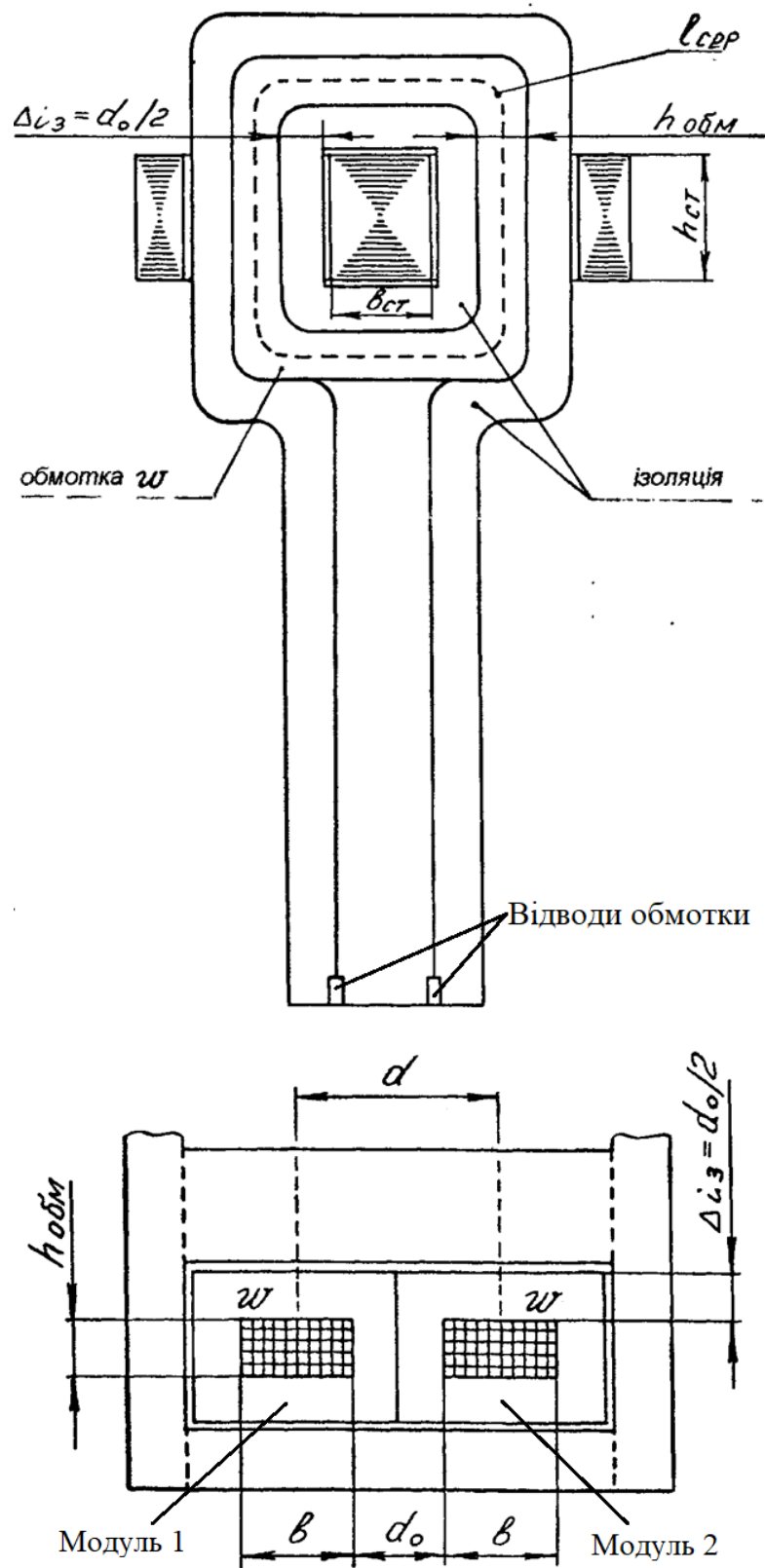


Рисунок 9.1 – Активна частина високовольного роздільного трансформатора.

Варіанти вхідних даних для виконання розрахунків

Варіант	f , Гц	Δ_{iz} , мм	$h_{обм}$, мм	$b_{обм}$, мм	$h_{ст}$, мм	$b_{ст}$, мм	W , вит.
1	390	6,0	8,0	14,0	34,0	26,0	5
2	391	6,1	7,9	14,1	34,2	25,9	6
3	392	6,2	7,8	14,2	34,4	25,8	7
4	393	6,3	7,7	14,3	34,6	25,7	8
5	394	6,4	7,6	14,4	34,8	25,6	5
6	395	6,5	7,5	14,5	35,0	25,5	6
7	396	6,6	7,4	14,6	35,2	25,4	7
8	397	6,7	7,3	14,7	35,4	25,3	8
9	398	6,8	7,2	14,8	35,6	25,2	5
10	399	6,9	7,1	14,9	35,8	25,1	6
11	400	7,0	7,0	15,0	36,0	25,0	7
12	401	7,1	8,0	15,1	36,2	24,9	8
13	402	7,2	7,9	15,2	36,4	24,8	5
14	403	7,3	7,8	15,3	36,6	24,7	6
15	404	7,4	7,7	15,4	36,8	24,6	7
16	405	7,5	7,6	15,5	37,0	24,5	8
17	406	7,6	7,5	15,6	37,2	24,4	5
18	407	7,7	7,4	15,7	37,4	24,3	6
19	408	7,8	7,3	15,8	37,6	24,2	7
20	409	7,9	7,2	15,9	37,8	24,1	8
21	410	8,0	7,1	16,0	38,0	24,0	5
22	409	7,9	7,0	14,0	37,8	26,0	6
23	408	7,8	7,1	14,1	37,6	25,9	7
24	407	7,7	7,2	14,2	37,4	25,8	8
25	406	7,6	7,3	14,3	37,2	25,7	5

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Schwarz H. Remarks on Power Density, Total Power and Pressure of Electron Beams as Welding, Cutting and Surfacing Tool // Rev. Sci. Instr., 1962, 33, № 6, p. 688.
2. Чвертко А.И., Назаренко О.К. и др. Оборудование для электронно-лучевой сварки. - К.: Наукова думка, 1973. - 408 с.
3. Зинченко Н.С. Курс лекций по электронной оптике. - Харьков: ХГУ, 1958.-275с.
4. Мик Дж., Крэгс Дж.. Электрический пробой в газах. - М.: Иностранная литература, 1960. -392с.
5. Приймальні та експлуатаційні випробування електроустаткування: навчальний посібник / В. Б. Абрамов, В. О. Бржезицький, О. П. Проценко. – К.: НТУУ «КПІ», 2015. – 218 с. – Бібліогр.: с. 209 – 211. – 300 пр.
6. Тараненко В.П. Электронные пушки. - Киев: Техника, 1964. - 180 с.
7. Кацман Ю.А. Электронные лампы для высоких и низких частот. -М. - Л.: Госэнергоиздат, 1961. -312 с.
8. Фоменко В.С. Эмиссионные свойства металлов. Справочник. Изд. 3-е, дополн. - К.: Наукова думка, 1970. -148 с.
9. Гинзбург Л.Д. Высоковольтные трансформаторы и дроссели с эпоксидной изоляцией. - Л.: Энергия, 1978. - 192 с.
10. Векслер Г.С. Расчет электропитающих устройств. - К.: Техника, 1978. - 208с.
11. Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А. Расчет индуктивностей. - Л.: Энергоатомиздат, 1986. - 488 с.
12. Бржезицкий В. А. Расчет и исследование электропроводности низкотемпературных плазм. Теплофизика высоких температур, 10, №1, с.7 – 21, 1972.